新疆空中水资源和地表水资源变化特征研究

姚俊强[1,2,3]
（1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,新疆 乌鲁木齐 830002；2. 中国气象局阿克达拉大气本底野外科学试验基地,新疆 阿克达拉 836499；3. 中国气象局树木年轮理化重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002）

摘　要：大气降水是新疆一切水资源的根本来源,空中水资源是大气降水的物质基础,大气降水在当地形成地表水资源。水资源短缺是制约新疆经济社会高质量发展和生态安全保障的最关键自然因素。本文分析新疆空中水资源和地表水资源的变化特征,对新疆水资源系统规划和高效利用具有重要的科学意义。结果显示:1961—2022年新疆年降水资源量为2717.12×10⁸ m³,水汽输入量为21115×10⁸ m³,水汽净收支量为347.5×10⁸ m³,水汽降水效率为12.5%;2001—2021年新疆平均水资源总量为912.3×10⁸ m³,其中地表水资源量为864.1×10⁸ m³,产水系数为0.32。从变化趋势来看,1961—2022年新疆年降水量明显增加,新疆上空水汽总输入量和总输出量微弱减少,水汽净收支量微弱增加,水汽降水效率明显增加;2001—2021年新疆地表水资源处于丰水阶段,但产水系数有微弱的波动减小趋势。新疆水资源问题依然突出,在不同水资源精细化特征、不同相态水体转化关系等方面研究不足,未来需要加强研究以应对气候变化可能带来的新疆水资源安全风险。

关键词：空中水资源；地表水资源；产水系数；变化特征；新疆

新疆是典型的干旱、半干旱地区,且水资源分布极不均匀,经济发展与水资源短缺的矛盾日益突出,水资源是制约和影响新疆经济社会发展、生态与环境保护的关键要素,水资源问题一直受到政府和社会各界的广泛关注[1-3]。大气降水、河水、湖泊水和地下水是新疆水资源利用的主要来源,高山冰川和季节积雪对新疆水资源起重要调节作用[4]。大气降水资源是新疆各类水资源的根本补给源,而大气水汽资源是降水的物质基础。在全球气候持续变暖背景下,新疆区域水循环加剧,水汽资源和降水资源的年际变化增大,未来新疆水资源不确定性问题更加明显[4-6]。因此,研究大气水汽资源和降水资源分布、演变特征和规律是科学开发利用空中水资源的基础,也是实施空中水资源开发工程的重要科学依据。

大气水分循环在气候和全球变化研究中占十分重要的作用,水汽输送是大气水物质和水循环的一个重要环节,而大气中的水汽和云水是最活跃的要素,并对气候系统中的能量转换有重要影响[7-10]。水汽输送及来源影响着区域水分平衡,是影响降水变化的重要因子,水汽输送变化直接关系着降水天气与气候状况。新疆空中水汽少且分布极不均匀,夏季水汽输送量最大[11]。水汽从西边界、北边界和南边界流入,东边界流出,在对流层中层输送量最大[12]。基于美国NCEP/NCAR再分析资料(2.5°×2.5°)分析了1961—2000年新疆水汽输入、输出及收支的气候变化特征,发现每年平均有26114.8×10⁸ m³的水汽流入新疆,25647.7×10⁸ m³的水汽流出新疆,水汽净收入量为467.1×10⁸ m³[12]。新疆独特的"山盆"结构和地形分隔作用影响,各地的水汽输送源地和路径差别颇大,在大气环流的作用下形成复杂的水汽输送通道[13]。虽然,气候态上新疆水汽输送主要来自于西方路径,但研究发现低纬阿拉伯海、孟加拉湾和青藏高原上空有大量的水汽可以向北输送到新疆,偏南、偏东路径的水汽输送对新疆夏季降水也有重要的影响[14-17]。

全球变暖对新疆水循环系统及水资源产生了重要影响。气候变化引起水循环结构发生改变,加

收稿日期：2023-07-30；　**修订日期**：2023-09-23
基金项目：第三次新疆综合科学考察项目课题(2022xjkk0101);新疆"天山英才"青年科技拔尖人才专项(2022TSYCCX0005);新疆"天山英才"科技创新团队(2022TSYCTD0007)共同资助
作者简介：姚俊强(1987-),博士,研究员,主要从事干旱区气候变化与水循环过程研究. E-mail: yaojq1987@126.com

剧了新疆关键水循环要素变率和降水资源量的不确定性，导致新疆水资源问题和高质量发展对水资源需求的矛盾更加突出[6]。以往研究多从水资源单方面分析比较多，而综合分析新疆地区降水资源量、空中水资源量和地表水资源的工作较少。因此，本文基于最新的ERA-5再分析数据、观测资料和公开发布的新疆水资源公报数据，系统分析了新疆空中水汽资源、降水资源和地表水资源的基本特征及变化趋势，为推进"丝绸之路经济带"建设的水资源安全保障和新疆水发展提供科技支撑。

1 数据来源与方法

1.1 水汽输送计算方法

利用1961—2022年欧洲中心ERA-5再分析逐月资料，计算新疆区域水汽收支变化，评估空中水汽资源量及变化。刘喆栋等[18]评估证实ERA-5再分析资料在新疆大气水汽研究中有很好的适用性，可以用来分析新疆大气水汽变化。

水汽通量(Q)表示单位时间流经某一单位面积的水汽质量，反映了水汽的输送强度。水汽输送通量的计算公式[19]为：

$$Q = -\frac{1}{g}\int_{P_s}^{P_z} V_n q \mathrm{d}P \quad (1)$$

式中：g为重力加速度($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$)；q为比湿($\mathrm{g \cdot kg^{-1}}$)；P为气压(hPa)；P_s为地面气压(hPa)；P_z为大气层顶气压(hPa)；V_n为与区域边界垂直的风速分量(u,v)($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$)。由于水汽输送量主要集中在大气低层，计算时仅从1000 hPa到500 hPa积分。水汽通量(Q)单位为$\mathrm{g \cdot (s \cdot cm)^{-1}}$。

计算新疆区域上空的边界水汽通量时，各边界的水汽通量分别为[19]：

$$Q_W = \sum_{i=1}^{m1} Q_\lambda(i) \times \Delta l_W \quad (2)$$

$$Q_E = \sum_{i=1}^{m2} -Q_\lambda(i) \times \Delta l_E \quad (3)$$

$$Q_S = \sum_{i=1}^{n2} Q_\varphi(i) \times \Delta l_S \quad (4)$$

$$Q_N = \sum_{n=1}^{n1} -Q_\varphi(i) \times \Delta l_N \quad (5)$$

$$Q_B = Q_W + Q_E + Q_N + Q_S \quad (6)$$

式中：Q_λ和Q_φ分别为纬向水汽通量和经向水汽通量；Q_W、Q_E、Q_N、Q_S分别为通过西边界、东边界、北边界、南边界的水汽通量；Q_B为通过新疆上空区域内的净水汽通量；i为格点数，其中，$m1$和$m2$分别为西边界和东边界上的格点数；$n1$和$n2$分别为北边界和南边界的格点数；Δl_W、Δl_E、Δl_N和Δl_S分别为各边界上的格距。若通过某边界的水汽通量为负值表示该边界有水汽输出，正值则表示有水汽输入。

1.2 数据来源

利用新疆地区1961—2022年89个常规气象站降水观测数据，数据来自新疆气象信息中心。2001—2021年新疆年降水资源量、水资源总量、地表水资源量来自《新疆水资源公报》；1956—2000年新疆多年平均水资源总量($832.7\times10^8\ \mathrm{m^3}$)和地表水资源量($788.7\times10^8\ \mathrm{m^3}$)数据来自文献[1]。

新疆人口数据来自2021年中国统计年鉴，人口数截止到2020年底；新疆有14个地州市，还有4个自治区直辖县级市，本文仅单独计算了石河子市降水资源量等统计数据，其余县级市并入地州计算，其中，阿拉尔市并入阿克苏地区计算、五家渠市并入昌吉计算、图木舒克市并入喀什地区计算。

2 结果与分析

2.1 新疆降水量及降水资源变化

2.2.1 降水量变化 1961—2022年新疆多年平均年降水量为163.2 mm，其中，天山山区降水最为丰富，年降水量为348.4 mm，新疆北部次之，年降水量为198.3 mm，新疆南部降水量稀少，年降水量为60.8 mm。从变化趋势来看，1961—2022年新疆年降水量呈增加趋势，增加速率为$8.5\ \mathrm{mm \cdot (10a)^{-1}}$；各区域来看，天山山区增湿速率最大，为$14.3\ \mathrm{mm \cdot (10a)^{-1}}$，其次是新疆北部，为$9.9\ \mathrm{mm \cdot (10a)^{-1}}$，新疆南部增湿速率最小，为$4.9\ \mathrm{mm \cdot (10a)^{-1}}$(图1)。总体来看，降水量多的地区增湿速率越大，反之亦然。

从年代际变化来看，新疆降水在1986年/1987年发生增湿突变，其中，1987—2022年新疆平均年降水量比1961—1986年增加了33.2 mm，增加了23%。各区域来看，1987—2022年新疆北部、天山和南疆降水量比1961—1986年期间分别增加了39.7 mm、51.8 mm和20 mm，分别增加了22.7%、16.3%和40.6%。增加绝对量来看，天山降水年代际增湿最大，其次是北疆和南疆；但从增加百分率来看，南疆增湿最明显，其次是北疆和天山山区。值

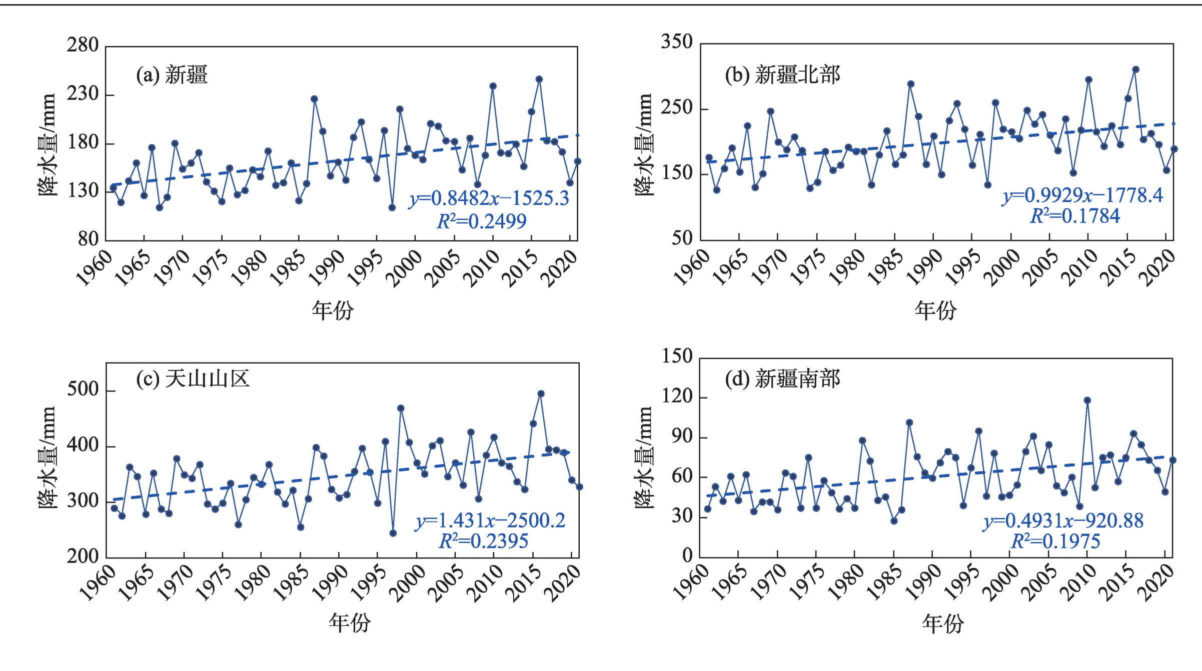


图1　1961—2022年新疆降水量变化

Fig. 1　Changes in precipitation in Xinjiang from 1961 to 2022

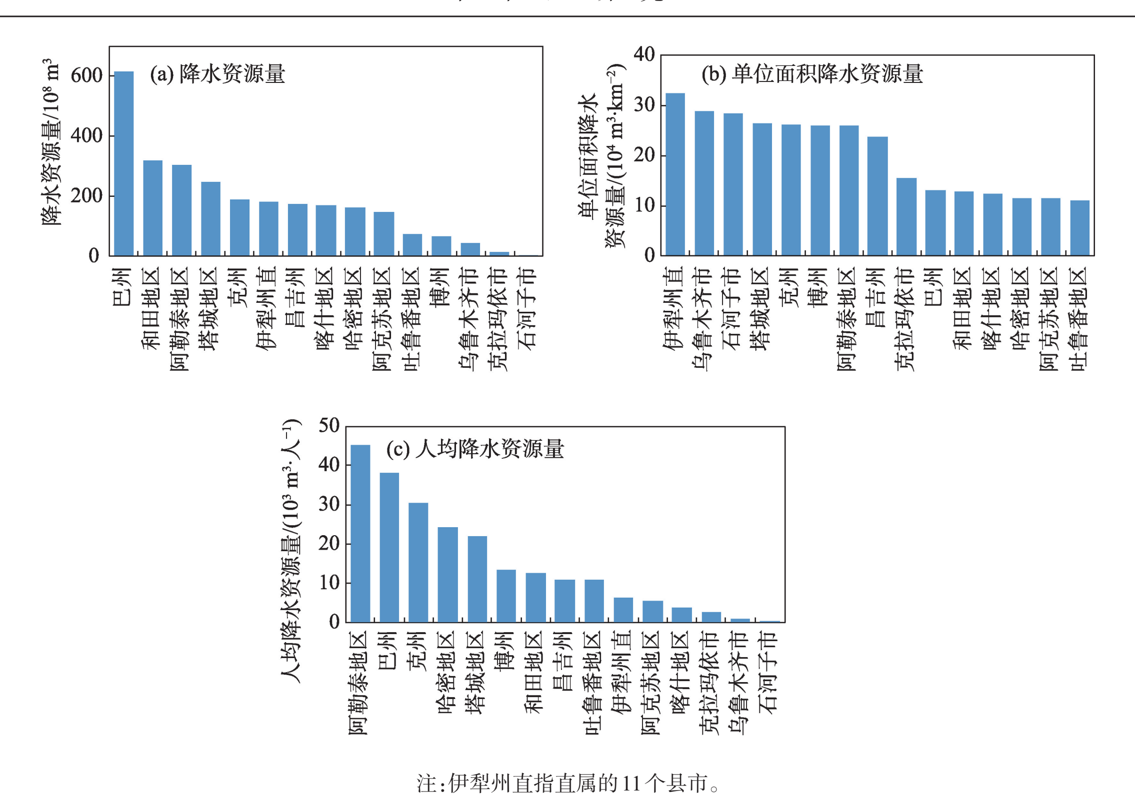
得注意的是，1987—2022年年际变率比1961—1986年更大，如1997年/1998年相邻年份中，1998年全疆降水量是1997年的1.9倍；1997年是天山山区历史降水最少年，而1998年为历史第二降水多年；2010年为南疆降水量最多年，是2009年降水量的3倍。同时，2016年是北疆和天山山区降水最多年。2016—2022年降水量呈持续减少态势，是否为变化趋势还有待进一步观测。

2.2.2　降水资源量变化　1961—2022年新疆多年平均年降水资源量为2717.12×10^8 m^3。新疆年降水资源量是全国最少的省区，仅占全国年降水资源总量的4.5%。新疆降水资源量呈北多南少、西多东少、山区多平原少的分布特点。各区域来看，巴音郭楞蒙古自治州（以下简称“巴州”）行政区域面积最大，总降水资源量最多，为616.5×10^8 m^3，其次是和田、阿勒泰和塔城地区，在250×10^8~320×10^8 m^3之间，而石河子市降水资源量最少（图2）。

新疆单位面积年降水资源量为16.3×10^4 m^3·km^{-2}，是全国单位面积年降水资源量的26%。总体来看，新疆单位面积年降水资源量低，其中，北疆各地州降水资源较丰富、南疆各地州相对贫乏。伊犁州是新疆降水资源最为丰富的区域，单位面积年降水资源量为32.3×10^4 m^3·km^{-2}，也仅仅达到全国的51.6%；其次是乌鲁木齐市、石河子市、塔城地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州（以下简称“克州”）、博尔塔拉蒙古自治州（以下简称“博州”）、阿勒泰地区和昌吉回族自治州，单位面积年降水资源量在23×10^4~29×10^4 m^3·km^{-2}；其他地区均在15×10^4 m^3·km^{-2}以下，吐鲁番地区是新疆降水资源最少的地州，单位面积年降水资源量仅为11.1×10^4 m^3·km^{-2}。虽然，新疆降水资源量和单位面积降水资源量匮乏，但人均年降水资源量较高，为10.5×10^3 m^3，约为全国人均量的2.5倍，但各地州之间差异显著。阿勒泰地区、巴州、克州人均降水资源量丰富，分别为45.3×10^3 m^3、38.2×10^3 m^3和30.5×10^3 m^3，为全国人均量的3倍以上；同时，喀什地区、克拉玛依市、乌鲁木齐市、石河子市仍低于全国人均水平，其中，乌鲁木齐市仅为全国平均量的24.6%（图2）。

2.2　新疆空中水汽资源变化

1961—2022年每年有21115×10^8 m^3水汽输入新疆，20767×10^8 m^3水汽输出新疆，新疆上空水汽净收支量为347.5×10^8 m^3。西边界、南边界和北边界以水汽输入为主，水汽输入量分别为21848.8×10^8 m^3、1940.3×10^8 m^3和2613.5×10^8 m^3，东边界以水汽输出为主，水汽输出量为20819.8×10^8 m^3。变化趋势来看，过去60 a新疆上空水汽总输入量和总输出量呈微弱的减少趋势，变化率基本一致，而水汽净收支量呈现微弱增加趋势（图3）。季节来看，夏季流经新疆的水汽输送量最大，总输入和总输出量分别占全年输送量的35.7%和36.9%；春、秋季次之，且输送



注：伊犁州直指直属的11个县市。

图2 1961—2022年新疆各地州降水资源量

Fig. 2 Distribution of precipitation water resources in Xinjiang from 1961 to 2022

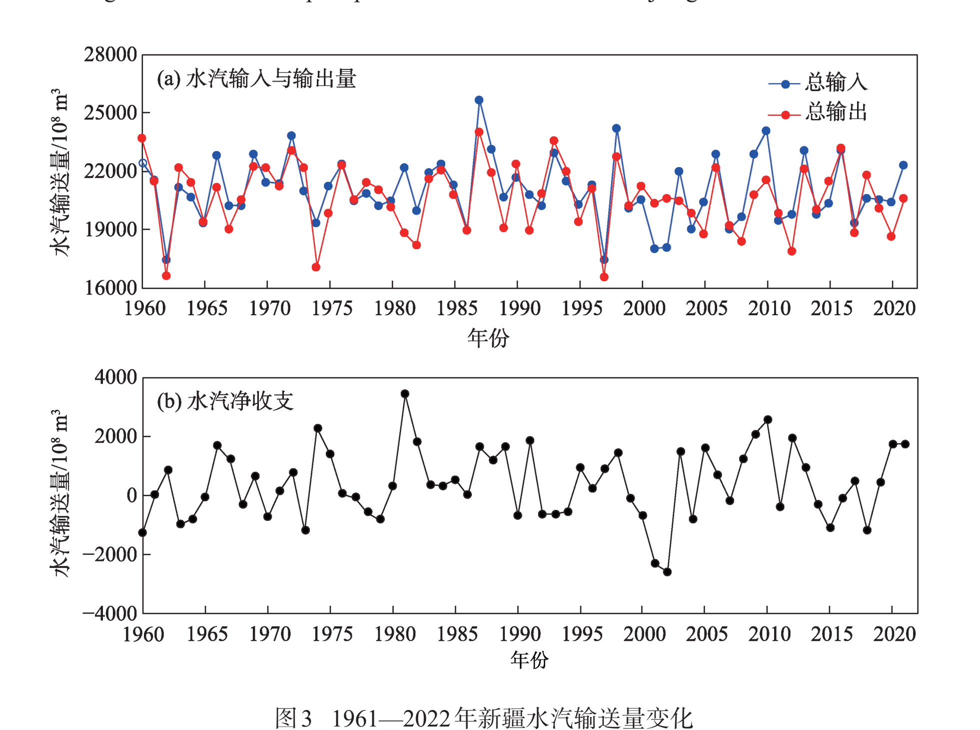


图3 1961—2022年新疆水汽输送量变化

Fig. 3 Changes in water vapor transport in Xinjiang from 1961 to 2022

量相当，占全年的23%~25%；冬季水汽输送量最小，约为全年的15%；水汽净收支量以春季和冬季为主，分别为331.4×10^8 m^{3}和144.6×10^8 m^3。

水汽输送边界来看，西边界水汽在四季均为输入，输送量占比分别为24.0%、37.7%、25.0%和13.3%，而东边界水汽在四季以输出为主，其占比分别为23.2%、36.8%、25.5%和14.5%；南边界水汽在四季自南向北输入，其占比分别为19.4%、13.7%、36.9%和30%；而北边界水汽自南向北流出，其占比分别为17.1%、37.4%、33.3%和12.2%(表1)。

表1 1961—2022年新疆各边界年水汽通量

Tab. 1 Annual water vapor fluxes across boundaries in Xinjiang from 1961 to 2022 /10^8 m^3

水汽通量	春季	夏季	秋季	冬季	年
西边界	5251.9	8243.1	5454	2899.8	21848.8
东边界	4841.4	7660.1	5300.1	3018.2	20819.8
南边界	375.8	265.2	716.3	583	1940.3
北边界	−446.3	−976.9	−869.9	−320.4	−2613.5
总输入	5120.2	7531.4	5300.4	3162.7	21115
总输出	4788.8	7660.1	5300.1	3018.2	20767
净收支	331.4	−128.8	0.3	144.6	347.5

注:西边界为正表示水汽自西向东输入新疆,为负表示水汽自东向西输出新疆。东边界为正表示水汽自西向东输出新疆,为负表示水汽自东向西输入新疆。南边界为正表示水汽自南向北输入新疆,为负表示水汽自北向南输出新疆。北边界为正表示水汽自南向北输出新疆,为负表示水汽自北向南输入新疆。

1961—2022年新疆水汽输入量、水汽输出量呈微弱的减少趋势,变化率分别为−36.4×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$ (P>0.05)和−69.6×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$(P>0.05),水汽输出趋势明显大于水汽输入的趋势,导致新疆上空水汽净收支呈增加趋势,增加速率为33.2×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$(P>0.05)。纬向和经向水汽输送变化来看,过去60 a纬向水汽输送无明显变化趋势,而经向水汽输送以32×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$的趋势增加。究其原因,水汽主要来源于净纬向水汽通量即净西风水汽通量,净纬向水汽通量在整个时段内呈现盈余状态,西风强弱的变化对水汽输入起主导作用,中纬度上空纬向西风减弱导致输入新疆的水汽总体减少;而从东边界流出水汽减少趋势更大,主要受新疆东部贝加尔湖反气旋异常增强影响,抑制了更多水汽流出新疆[3];同时,在新疆西部有异常的中亚气旋增强,加强经向环流,使得更多的西南路径水汽进入新疆[3],以上共同导致新疆上空水汽含量和水汽净收支增加。

新疆水汽输送变化有明显的阶段性变化特征。新疆水汽净收支量有3个变化阶段,其中,1961—1981年呈微弱增加趋势,变化率为392×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$(P>0.05),在1981—2002年期间呈显著减少趋势,变化率为−1325×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$(P<0.05),而2002—2022年有波动增加趋势,变化率为270×10^8 m^3·(10a)$^{-1}$(P>0.05)(图4)。纬向和经向水汽输送变

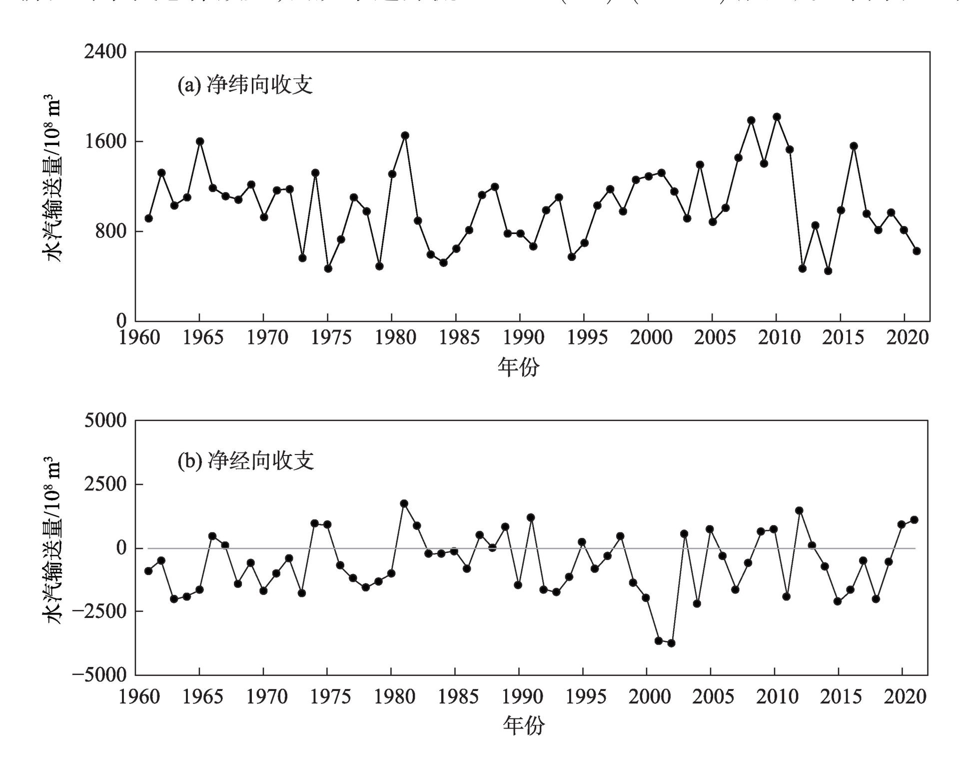


图4 1961—2022年新疆净纬(经)向水汽通量变化

Fig. 4 Changes in latitudinal (or longitudinal) net water vapor flux in Xinjiang from 1961 to 2022

化也有3个变化阶段，但在变化趋势上存在差异。纬向水汽输送经历了减少-增加-减少的阶段性变化，而经向水汽输送呈增加-减少-增加的阶段性变化（图4）。虽然，水汽净收支变化趋势与经向水汽输送变化一致，但从气候态变化来看，新疆流入的水汽依然以净纬向水汽输送为主，经向水汽输送更多反映在异常降水过程上。

2.3 新疆水汽降水效率变化

水汽降水转化效率是在一定区域、一段时间内，降水总量占空中水汽总量的比率，也称为水汽转化率。1961—2022年新疆区域的水汽降水效率总体偏低，平均水汽降水效率为12.5%。1961—2022年新疆平均水汽降水效率变化呈明显增加趋势，增加速率为0.64%·$(10a)^{-1}$（$P<0.05$）（图5）。年代际变化来看，水汽降水效率从1987—2022年的11.1%增加到1961—1986年的13.6%，说明气候“暖湿化”背景下新疆水汽降水效率增加了2.5%。

2.4 新疆地表水资源量及变化

据新疆水资源公报数据显示，2001—2021年新疆多年平均降水资源量为2901.5×10^8 m^3，多年平均水资源总量为912.3×10^8 m^3，其中，地表水资源量为864.1×10^8 m^3。新疆水资源总量和地表水资源量均随降水资源量的变化而呈年际波动变化（图6）；在过去20 a间，2010年水资源量最多，而2014年是最枯年。与1956—2000年水资源相比，2001—2021年新疆水资源总量增加了79.6×10^8 m^3，增幅为9.56%；地表水资源量增加了75.6×10^8 m^3，增幅为9.59%。综上所述，2001—2020年新疆水资源总体处于丰水时段。

产水系数反映了一个地区降水量转化为水资源量的能力，是区域内水资源总量与降水资源量的比值[20-21]，主要受降水资源多寡和下垫面条件变化的影响。气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响，可以直接导致产水系数的变化。2001—2021年新疆平均产水系数为0.32，小于全国平均值（0.4）。2001—2021年间新疆区域产水系数变化幅度较小，在0.28~0.38之间，有微弱的波动减小趋势，倾向率为-0.012%·$(10a)^{-1}$（图7）。值得注意的是，产水系数与降水资源量呈显著负相关，相关系数为 -0.54。比如，2016年新疆历史降水资源量最多，而产水系数仅为0.29，仅次于2018年的0.28。反映了新疆干旱区下垫面条件对河流产汇流过程影响的复杂性。

2015年新疆水资源总量、地表水资源量、降水资源量和产水系数与2001—2020年新疆平均值接近，因此，选择2015年作为代表年来分析新疆水资源变化情况。按2015年新疆水资源公报数据，2015年新疆降水资源量为2942×10^8 m^3，地表水资源量为873.1×10^8 m^3，地下水资源量为536.3×10^8 m^3，扣除地下水资源与地表水资源重复计算量491.6×10^8 m^3，全疆水资源总量为917.6×10^8 m^3，平均产水系数为0.31。在地表径流方面，2015年河川径流总量为978.2×10^8 m^3，从国外和省外入境水量105.1×10^8 m^3，流出国境和流入外省水量225.5×10^8 m^3。在大气水收支方面，2015年各边界有20450.2×10^8 m^3水汽输入新疆，有21562×10^8 m^3水汽输出新疆。

3 讨 论

受高大山地、荒漠等复杂地形和下垫面影响，新疆降水观测站点分布极不均匀，山区观测稀缺，影响了区域降水量精细化分布特征的科学认识。不同网格化插值方案得出的新疆降水资源量存在差异，如距离平方反比法和多元回归法得出新疆年

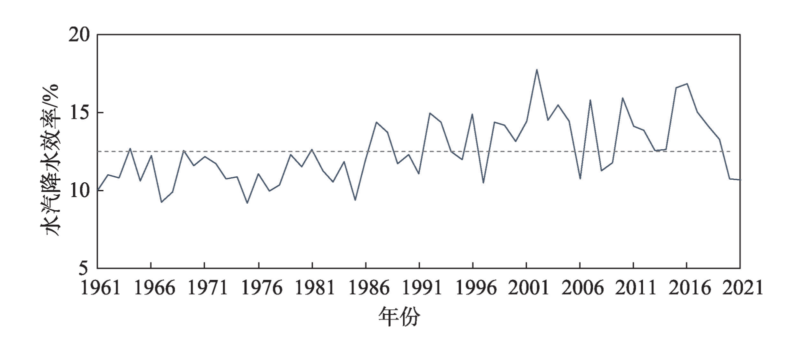


图5 1961—2022年新疆水汽降水效率变化

Fig. 5 Changes in precipitation conversion efficiency in Xinjiang from 1961 to 2022

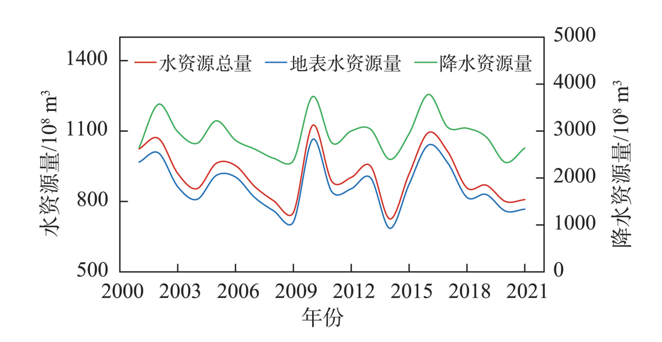


图6　2001—2021年新疆水资源总量、地表水资源量和降水资源量变化

Fig. 6　Changes in water resources, surface water resources and precipitation water resources in Xinjiang from 2001 to 2021

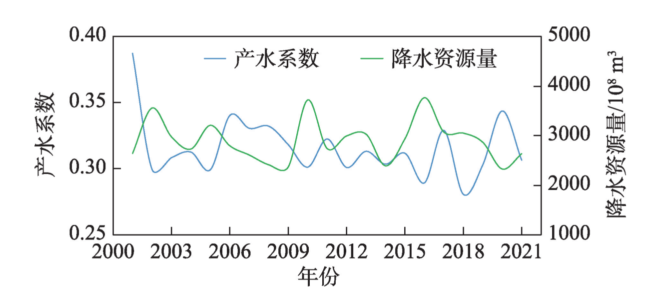


图7　2001—2021年新疆产水系数和降水资源量变化

Fig. 7　Changes in water yield coefficient and precipitation water resources in Xinjiang from 2001 to 2021

降水资源量为3086×10⁸ m³和3098×10⁸ m³，而梯度距离平方反比法（GIDS）为2724×10⁸ m³。本文得出新疆年降水资源量为2717.12×10⁸ m³，与GIDS方法结果相近，而GIDS被认为是新疆降水的最优插值方案[22]。随着加密自动气象站、卫星遥感、雷达等高水平分辨率观测数据的增加和人工智能技术方案的改进，下一步需要开展复杂地形影响下新疆降水资源量精细化研究，获取更加精准的数据。

新疆空中水资源较为丰富，本文基于ERA-5资料得出，1961—2022年每年流入新疆上空的水汽总量约为21115×10⁸ m³，而基于NCEP/NCAR资料得出1961—2000年每年流入新疆上空的水汽总量约为26114×10⁸ m³[12]。可以看出，不同资料的空间分辨率、时间范围和计算边界存在差异，得出的空中水汽总量有所不同。此外，空中水汽总量还存在空间差异性，如天山、阿尔泰山和昆仑山等高大山系是西风环流携带水汽必经之路，是降水天气系统的迎风坡，受地形影响有利于空中水汽汇集和气流抬升而形成降水，是空中水汽总量最为丰富的区域。同时，西北气候"暖湿化"背景下区域水分内循环加剧，山区及周边绿洲空中水汽明显增加[23-25]，为云水资源开发利用提供了新机遇。因此，充分利用气候"暖湿化"的有利时机，提高云水资源转化效率，增加降水资源量，使得空中水资源开发利用成为解决新疆水资源短缺问题的关键科学途径之一。

针对新疆空中水资源的研究，本文集中在水汽收支、空中水汽资源的研究上，未开展针对云水资源精细化特征的研究。值得注意的是，空中水汽不能直接形成降水，只有很少的部分水汽转化成云水，云水凝结后形成降水，而提高云水凝结形成降水过程的效率是云水资源开发利用的基点[26-27]。新疆现有云降水物理的连续监测稀缺，缺乏对新疆云水含量、云水收支及云水资源精细化特征的精准认识，以及云降水物理过程及云降水效率的深入研究。

20世纪80年代以来，新疆气候处于"暖湿化"阶段，大气降水增多、河流来水偏丰[1]。虽然，21世纪以来，新疆地表水资源和水资源总量比之前增加了9%以上，但是降水量的年际变率增大，降水和地表水资源变化的不确定性加剧。气候预估表明，未来新疆持续增暖增湿，但增温速率远远大于增湿速率，干旱风险增大[28]。新疆气温持续升高引起冰川退缩和积雪消融加剧，冰冻圈呈持续萎缩状态。长期监测的中国天山乌鲁木齐河源1号冰川和阿勒泰山区木斯岛冰川呈加速消融趋势，处于物质高亏损状态，其中，2022年乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡量为有观测记录以来第二低值，冰川末端退缩距离为有观测记录以来的最大值[29]。至21世纪中期，中小规模冰川变化出现"拐点"且不可逆转，部分冰川最终将大幅减少甚至消失，引起固体水资源和冰川融水补给量锐减，"固态水库"对径流的调节作用随之减弱或消失，地表径流的稳定性降低[4,6]。在变暖背景下，极端气候水文事件频发重发，水循环系统不稳定性加剧，给新疆水资源安全带来了严峻的挑战，未来水资源短缺更加凸显[3]。

针对上述新疆水资源研究中存在的问题，未来亟需开展的研究包括以下方面：

（1）干旱区云降水物理过程和云水资源精细化研究。开展空-天-地云降水物理和空中云水资源监测开发利用综合科学试验；开展干旱区云微物理特征研究；基于空-天-地综合观测，研发干旱区云

水资源精细化评估方法，研究干旱区大气水分循环、云水资源分布、演变特征和规律。

（2）干旱区水资源多元转化关系研究。开展干旱区“水汽-云水-降水-地表径流”多相态水体转化过程研究；揭示全球变化背景下多相态水体加速转化机理和产生不同降水效率的成因。

（3）干旱区典型云系降水效率及增水效果检验。开展干旱区典型云系降水效率时空分布规律及降水量的评估研究，研发典型云系降水效率监测评估技术；研发面向生态修复、冰川补冰等不同对象的效果检验技术和综合效益评价方法。

（4）空中云水资源开发与空地水资源联合调控技术。发展干旱区大气降水效率优化调控理论和方法；研发干旱区空中云水资源开发与地表水利工程联合调控关键技术，实现干旱区空地水资源联合调控和耦合利用。

4 结 论

（1）1961—2022年新疆年降水量呈增加趋势，增加速率为8.5 mm·(10a)$^{-1}$，天山山区增湿速率最大，其次是新疆北部，新疆南部增湿速率最小；在1986年/1987年发生增湿突变，多年平均年降水量增加了33.2 mm（增加百分率为23%）；1961—2022年新疆多年平均年降水资源量为2717.12×10^{8} m^{3}，单位面积年降水资源量为16.3×10^{4} m^{3}·km^{-2}，但人均年降水资源量较高，为10.5×10^{3} m^{3}，各地州降水资源量差异显著。

（2）1961—2022年每年均有21115×10^{8} m^{3}水汽输入新疆，20767×10^{8} m^{3}水汽输出新疆，新疆上空水汽净收支量为347.5×10^{8} m^{3}；过去60 a新疆上空水汽总输入量和总输出量呈微弱的减少趋势，而水汽净收支量呈现微弱增加趋势。新疆水汽净收支量有3个变化阶段，其中，1961—1981年呈微弱增加趋势，1981—2002年呈显著减少趋势，而2002—2022年有波动增加趋势。新疆区域平均水汽降水效率为12.5%，1961—2022年水汽降水效率明显增加，增加速率为0.64%·(10a)$^{-1}$。

（3）2001—2021年新疆平均水资源总量为912.3×10^{8} m^{3}，其中，地表水资源量为864.1×10^{8} m^{3}。与1956—2000年水资源相比，2001—2021年新疆水资源增加了9.56%，总体处于丰水期。新疆平均产水系数为0.32，2001—2021年产水系数有微弱的波动减小趋势，且与降水资源量呈显著负相关。

致谢：感谢硕士研究生曲良璐在水汽收支计算方面提供的帮助。

参考文献（References）：

[1] 李江, 龙爱华. 近60年新疆水资源变化及可持续利用思考[J]. 水利规划与设计, 2021, 33(7): 1-5, 72. [Li Jiang, Long Aihua. Consideration on the change and sustainable utilization of water resources in Xinjiang in recent 60 years[J]. Water Resources Planning and Design, 2021, 33(7): 1-5, 72.]

[2] 邓铭江, 龙爱华, 李江, 等. 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析[J]. 地理学报, 2020, 75(7): 1333-1345. [Deng Mingjiang, Long Aihua, Li Jiang, et al. Theoretical analysis of “natural-social-trading” ternarywater cycle mode in the inland river basin of Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(7): 1333-1345.]

[3] Yao Junqiang, Chen Yaning, Guan Xuefeng, et al. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103957.

[4] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393. [Chen Yaning, Li Zhongqin, Xu Jianhua, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of Northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.]

[5] Yao Junqiang, Zhao Yong, Chen Yaning, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 630: 444-452.

[6] Chen Yaning, Li Baofu, Fan Yuting, et al. Hydrological and water cycle processes of inland river basins in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(2): 161 - 179.

[7] Trenberth Kevin, Christian Guillemot. Evaluation of the global atmospheric moisture budget as seen from analyses[J]. Journal of Climate, 1995, 8(9): 2255-2272.

[8] Lennart Bengtsson. The global atmospheric water cycle[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5: 025202.

[9] 蔡淼. 中国空中云水资源和降水效率的评估研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013. [Cai Miao. Cloud Water Resources and Precipitation Efficiency Evaluation over China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2013.]

[10] 丁一汇, 胡雯, 黄勇, 等. 淮河流域能量和水分循环研究进展[J]. 气象学报, 2020, 78(5): 721-734. [Ding Yihui, Hu Wen, Huang Yong, et al. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: A historical review [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(5): 721-734.]

[11] Yao Junqiang, Chen Yaning, Yang Qing. Spatial and temporal variability of water vapor pressure in the arid region of Northwest China, during 1961- 2011[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(3): 683 - 691.

[12] 史玉光, 孙照渤. 新疆水汽输送的气候特征及其变化[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 310- 319. [Shi Yuguang, Sun Zhaobo. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(2): 310 - 319.]

[13] Yao Junqiang, Li Moyan, Yang Qing. Moisture sources of a torrential rainfall event in the East Xinjiang, arid China, based on a Lagrangian model[J]. Natural Hazards, 2018, 92(1): 183 -195.

[14] Huang Wei, Song Feng, Chen Jianhui, et al. Physical mechanisms of summer precipitation variations in the Tarim Basin in Northwestern China[J]. Journal of Climate, 2015, 28(9): 3579 - 3591.

[15] Zhao Yong, Yu Xiaojing, Yao Junqiang, et al. The concurrent effects of the South Asian monsoon and the plateau monsoon over the Tibetan Plateau on summer rainfall in the Tarim Basin of China [J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(1): 74–88.

[16] Zhao Yong, Zhang Huqiang. Impacts of SST warming in tropical Indian Ocean on CMIP5 model-projected summer rainfall changes over Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2015, 46 (9–10): 3223–3238.

[17] Zhou Yushu, Xie Zeming, Liu Xin. An analysis of moisture sources of torrential rainfall events over Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(10): 2109–2122.

[18] 刘喆栋, 黄良珂, 刘立龙, 等. 新疆地区ERA5和MERRA–2大气可降水量精度分析[J/OL]. 桂林理工大学学报: 1–9. [2023 - 09 - 11]. [Liu Zhedong, Huang Liangke, Liu Lilong, et al. Accuracy analysis of precipitable water vapor products of ERA5 and MERRA- 2 in Xinjiang[J/OL]. Journal of Guilin University of Technology, 1–9. [2023–09–11].

[19] Qu Lianglu, Yao Junqiang, Yong Zhao. Mechanism analysis of the summer dry-wet interdecadal transition in the Tarim Basin, Northwest China[J]. Atmospheric Research, 2023, 291: 106840.

[20] 王绍业, 倪用鑫, 彭华, 等. 近20年延河流域生长季产水系数时空变化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 423–429. [Wang Shaoye, Ni Yongxin, Peng Hua, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of water yield coefficient in the growth season of Yanhe River Basin in the past 20 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 423–429.]

[21] 朱得胜, 吕锡芝, 倪用鑫, 等. 2001–2018年伊洛河流域产水系数演变分析[J]. 中国农村水利水电, 2022, 47(9): 139–145. [Zhu Desheng, Lv Xizhi, Ni Yongxin, et al. An analysis of the changes in the water yield coefficient in the Yiluo River Basin from 2001 to 2018[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022, 47(9): 139–145.]

[22] 史玉光. 新疆降水与水汽的时空分布及变化研究[M]. 北京: 气象出版社, 2014. [Shi Yuguang. Spatial and Temporal Distribution and Variation of Precipitation and Water Vapor in Xinjiang [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.]

[23] Yao Junqiang, Chen Yaning, Zhao Yong, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124823.

[24] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814- 1828. [Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidificationin Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814–1828.]

[25] 刘维成, 张强, 傅朝. 近55年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1533- 1545. [Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Chao. Variation characteristics of precipitation and its affecting factors in Northwest China over the past 55 years[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1533–1545.]

[26] Zhou Yuquan, Cai Miao, Tan Chao, et al. Quantifying the cloud water resource: Basic concepts and characteristics[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(6): 1242–1255.

[27] Cai Miao, Zhou Yuquan, Tang Yahui, et al. Diagnostic quantification of the cloud water resource in China during 2000- 2019[J]. Journal of Meteorological Research, 2022, 36(2): 292–310.

[28] Guan Jingyun, Yao Junqiang, Li Moyan, et al. Historical changes and projected trends of extreme climate events in Xinjiang, China [J]. Climate Dynamics, 2022, 59: 1753–1774.

[29] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书(2023)[M]. 北京:科学出版社, 2023. [China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2023[M]. Beijing: Science Press, 2023.]

Change in atmospheric and surface water resource in Xinjiang

YAO Junqiang[1, 2, 3]

(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China; 2. Field Scientific Experiment Base of Akdala Atmospheric Background, China Meteorological Administration, Akdala 836499, Xinjiang, China; 3. Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: The scarcity of water resources is the most critical natural factor impeding high-quality economic and social development and ecological security in Xinjiang. This paper systematically analyzes trends in precipitation, atmospheric water resources, and surface water resources in Xinjiang. It also establishes the conversion relationship between different water resources in Xinjiang. The findings reveal that annual precipitation water resources amount to 2717.12×10^8 m^3, with water vapor input reaching 21115×10^8 m^3, resulting in a net water vapor income of 347.5×10^8 m^3. Between 1961 and 2022, Xinjiang experienced a 12.5% increase in precipitation conversion. The annual total water resources in Xinjiang is 912.3×10^8 m^3, where surface water resources constituted 864.1×10^8 m^3 from 2001 to 2020, resulting in a water yield coefficient of 0.32. The observed trends show a significant increase in annual precipitation in Xinjiang, a slight decrease in total water vapor input, a marginal increase in net water vapor income, and a significant increase in precipitation conversion between 1961 and 2022. Although surface water resources in Xinjiang are abundant, the water yield coefficient exhibited a weak fluctuating decreasing trend from 2001 to 2020. Nevertheless, prominent issues persist in water resources research in Xinjiang, including insufficient studies on precipitation water resource volumes, understanding of cloud water resource characteristics, and continuous monitoring of the physical process of cloud precipitation. To address these challenges, it is imperative to conduct comprehensive scientific field experiments on cloud precipitation physics, including strengthening research on the physical processes of cloud precipitation, refining cloud water resource assessments, and examining precipitation efficiency and water increase effects within typical cloud systems. These studies will aid in developing cloud water resources and air-groundwater resources joint control technology for arid areas.

Keywords: atmospheric water resource; surface water resource; water yield coefficient; change; Xinjiang